

Научная статья

УДК 678.747.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-46-63

## ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ РЕЗКИ НА СТРУКТУРУ И УПРУГО-ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ УГЛЕПЛАСТИКА

*Р.Р. Иваньков<sup>1</sup>, О.Н. Клименко<sup>1</sup>, И.Н. Гуляев<sup>1</sup>, Н.В. Осияненко<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Рассмотрены пять наиболее часто используемых методов для резки изделий и конструкций из полимерных композиционных материалов. Приведены основные преимущества и недостатки каждого из них, а также конструктивные особенности и принципы работы инструментов, с помощью которых осуществляется изготовление элементарных образцов. Приведены прочностные показатели и структура углепластиков, которые изготовлены разными методами резки. С помощью метода рентгенокомпьютерной томографии проведен анализ дефектной зоны полимерного композиционного материала.

**Ключевые слова:** углепластик, резка углеродных полимерных композиционных материалов, прочность углеродных полимерных композиционных материалов, адгезия, полимерное связующее, рентгенокомпьютерная томография

**Для цитирования:** Иваньков Р.Р., Клименко О.Н., Гуляев И.Н., Осияненко Н.В. Влияние различных методов резки на структуру и упруго-прочностные свойства образцов углепластика // Труды ВИАМ. 2025. № 6 (148). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-46-63.

Scientific article

## THE INFLUENCE OF DIFFERENT CUTTING METHODS ON THE TEXTURE AND STRESS-RELATED PROPERTIES OF CARBON FIBER SAMPLES

*R.R. Ivankov<sup>1</sup>, O.N. Klimenko<sup>1</sup>, I.N. Gulyaev<sup>1</sup>, N.V. Osiyanenko<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** The article treats the five most commonly used methods for cutting products and structures made of polymer composite materials and provides the main advantages and disadvantages of each of them. This article also outlines the design features and principles of operation of each type of tool, with which the manufacture of standard test samples is carried out. The strength parameters and structure of carbon fiber plastics, which were made by different cutting methods, are given. Using the method of X-ray computed tomography, the analysis of the defective zone of the polymer composite material was carried out.

**Keywords:** carbon fiber reinforced plastics, cutting of carbon fiber polymer composite material, strength properties of carbon fiber polymer composite material, adhesion, polymer binder, X-ray computed tomography

**For citation:** Ivankov R.R., Klimenko O.N., Gulyaev I.N., Osiyanenko N.V. The influence of different cutting methods on the texture and stress-related properties of carbon fiber samples. *Trudy VIAM*, 2025, no. 6 (148), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-6-46-63.

## Введение

В XXI веке значительно увеличился спектр задач по изготовлению новых изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ). В настоящее время конструкторы используют новые методы по созданию конструкций, креплений, деталей из стекло- и углепластиков. Использование данных материалов позволяет снизить массу изделий и повысить прочность некоторых узлов и агрегатов летательных аппаратов. Так, доля ПКМ в современном узкофюзеляжном самолете отечественного производства МС-21 составляет >50 %. Следует учитывать и то, что углепластики также востребованы при производстве автомобилей и ракетно-космической техники [1–5].

Индустрия полимеров активно развивается, появляются новые технологии по созданию клеев, препрегов, различного вида связующих и композиционных материалов [6–8]. Оценка свойств разрабатываемых и производимых материалов – это важная часть научно-технического и производственного процесса, поэтому одной из важных операций при изготовлении образцов является резка. На данный момент существует несколько методов обработки стекло- и углепластиков и каждый из них имеет свои особенности, преимущества и недостатки [9–30].

Процесс резки ПКМ отличается от аналогичной операции для металлов, что связано со структурными и физическими особенностями композиционных материалов:

- разрушение структуры такого материала происходит в виде трещин, которые в процессе механического воздействия разрастаются, что свидетельствует о наличии ярко выраженной анизотропии структуры; при резании ПКМ также выделяется большое количество мелкодисперсной фракции;

- высокая твердость ПКМ вызывает сопротивление резанию и затрудняет процесс, что приводит к изнашиванию режущего инструмента;

- в процессе резания ПКМ происходит разрушение химических связей вследствие термической деструкции, при этом выделяются газообразные продукты, которые вредны для здоровья человека.

Цель данной работы – исследование влияния различных видов резки ПКМ на структуру и упруго-прочностные свойства образцов углепластика.

В последнее время самым распространенным методом изготовления образцов из ПКМ является фрезерование и резка алмазным диском [9, 10, 16–18, 20]. Однако следует обратить внимание на то, что данные виды обработки вредны для здоровья человека, так как в процессе резания образуются мелкодисперсные частицы, которые способны проникать в легкие при дыхании [10, 25]. Именно поэтому операторы станков с ЧПУ и механической резки алмазным диском всегда должны обеспечиваться средствами индивидуальной защиты, такими как респираторы, очки, плотные технические халаты, перчатки для защиты рук, а также каждое рабочее место должно быть снабжено вентиляцией [20].

Поскольку ПКМ являются анизотропными материалами, то в процессе фрезерования и резки алмазным диском часто возникает расслоение материала, при этом происходит разрушение внутренней структуры материала. Так как угле- и стеклопластики обладают высокими показателями модуля упругости, то в процессе механической резки изнашиваются кромки режущих инструментов – сверл, фрез, алмазных дисков. При механической обработке материала разрушаются молекулярные связи в полимерных цепях, а также возникает термодеструкция из-за сильного разогрева режущего инструмента [11, 20]. Для того чтобы уменьшить давление на инструмент и снизить его износ зачастую прибегают к подаче охлаждающей жидкости. Для резки ПКМ с высоковязкими матрицами данное условие является обязательным [20].

Алмазный круг на 80 % состоит из меди, а его кромка – из мягкого сплава, в который в процессе плавления вставлены частицы алмаза. Размеры дисперсных частиц алмаза составляют до 0,5 мм. Для резки ПКМ необходимо учитывать тот факт, что круги с крупными зёрнами способны быстро разрезать, но обладают свойством травмировать поверхность изделия [20].

Важными параметрами при резке плит и изделий из ПКМ алмазными дисками являются:

- наличие и вид охлаждающей жидкости;
- скорость движения образцов навстречу диску;
- скорость вращения алмазного круга;
- геометрические размеры, форма и вид ПКМ;
- зернистость;
- угол, при котором осуществляется резка изделия;
- усилие подачи или закрепления ПКМ;
- физическое состояние режущего инструмента (температура, износ, дефекты).

На рис. 1 представлено схематическое изображение фрагмента алмазного диска.

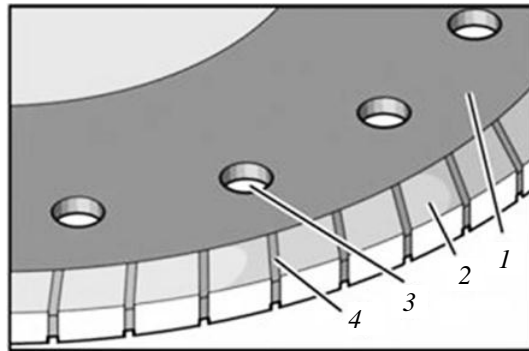


Рис. 1. Схематическое изображение фрагмента диска: 1 – тело диска; 2 – лента сегментов; 3 – отверстие для амортизации вибрации; 4 – углубление в сегментах

Чем сильнее изнашивается режущий диск, тем больше образцы на основе углеродных и стеклянных тканей будут иметь механических дефектов, таких как заусенцы, сколы, вытягивание волокон и микротрещины [9–11, 18, 20, 22]. Именно поэтому инструмент необходимо содержать в чистоте, а в случае его износа быстро и своевременно заменять.

В статье [20] изложены следующие основные требования, предъявляемые к станку для резки ПКМ:

- скорость движения алмазного круга – не более 2700 об/мин;
- наличие охлаждающей жидкости для меньшего повреждения ПКМ и его поверхности;
- наличие вентиляции и постоянный контроль режущего инструмента во избежание его износа.

Выполнение этих пунктов позволит изготавливать образцы, которые соответствуют требованиям стандартов (ГОСТ, ASTM и EN) для различных видов испытаний. Алмазный круг наиболее часто используется при изготовлении прямоугольных образцов.

Процесс фрезерования является одним из самых часто используемых видов механической обработки ПКМ [23–33] и, так же как и другие методы механической обработки, имеет свои преимущества и недостатки. В настоящее время проводятся активные работы по расчету и математическому моделированию процесса фрезерования ПКМ. Представляет интерес расчет методом конечных элементов нагрузки, температур воздействия режущего инструмента и температуры ПКМ во время механической обработки [25, 26, 29–31, 33, 34], а также влияние геометрического размера фрезы на результаты механической обработки изделий [32]. Данный вид механической обработки так же вреден для здоровья человека, как и резка алмазным кругом [25].

Самыми существенно выраженными недостатками метода фрезерования ПКМ на станке с ЧПУ являются:

- вибрация и биение фрезы во время механической обработки ПКМ, что может привести к ее износу [25, 28];
- уменьшение силы резки ПКМ во время длительной работы и износа режущего инструмента [25, 26];
- повышение температуры и перегрев режущего инструмента в процессе работы [25, 26];
- срыв или поломка фрезы при долгой работе станка с ЧПУ [25, 28, 32, 33];
- термическая деструкция полимерной матрицы в ПКМ в результате долгого воздействия повышенных температур [33, 34];
- расслаивание изделий из-за вибрационных нагрузок во время резки [26];
- образование заусенцев, сколов и других видов дефектов [25–27, 33, 34].

Поскольку в процессе фрезерования возникает существенное абразивное воздействие на инструмент, появляется необходимость углублять оснастку для изготовления деталей, изделий и образцов на 3–5 мм. В настоящее время чаще всего используются рашпильные фрезы (рис. 2), которые позволяют достигнуть чистого реза при высоких скоростях подачи ПКМ [33].



Рис. 2. Рашпильная фреза для резки ПКМ

Одними из недостатков таких фрез являются легкость засорения канавок, а также разрушение и истирание кончиков зубьев [33]. Из-за постоянного воздействия углеродного волокна на инструмент изнашивается его покрытие, что в свою очередь негативно воздействует на режущую кромку. Это приводит к расслаиванию материала и снижению физико-механических свойств ПКМ.

Таким образом, использование метода фрезерования для механической обработки ПКМ требует основательного подхода и учета всех ограничений, связанных со скоростью, температурой разогрева и прочностью режущего инструмента.

Гидроабразивная резка является одним из самых перспективных методов обработки, так как имеет уникальные технологические свойства [10, 12–16]. Данный вид резки образцов позволяет получать изделия из ПКМ с высокой точностью и по сравнению с механическим методом является более благоприятным с точки зрения экологии и здоровья человека.

Принцип работы гидроабразивного станка достаточно прост. Вода под высоким давлением попадает в специальную трубку для смешивания с абразивом. После смешивания воды с абразивом смесь подается под большим давлением на поверхность материала, который необходимо разрезать. Схема работы станка представлена на рис. 3. Режущая струя калибруется с помощью сопла.

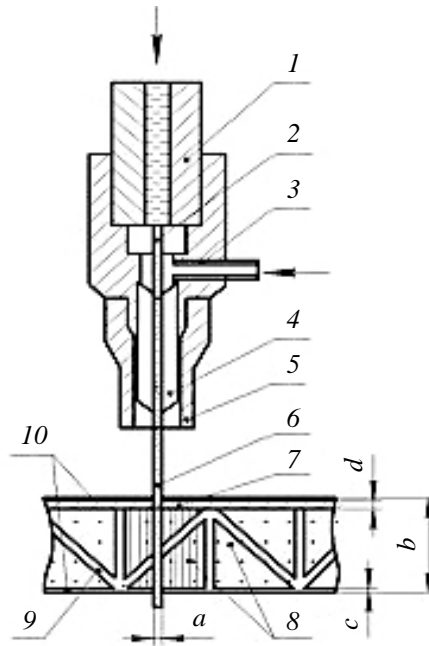


Рис. 3. Схема гидроабразивного станка:  $a$  – толщина реза;  $b$  – толщина изделия из ПКМ;  $c$  – толщина обшивки;  $d$  – толщина металлической вставки; 1 – магистраль для подвода воды под высоким давлением; 2 – сопло; 3 – патрубок для подачи абразива; 4 – смеситель; 5 – кожух; 6 – режущая струя воды с абразивом; 7 – металлическая вставка в панели из ПКМ; 8 – внутренняя структура панели из разнородных наполнителей; 9 – внутреннее ребро жесткости панели; 10 – верхняя и нижняя обшивки панели [21]

В авиационной и ракетно-космической отраслях гидроабразивная резка применяется достаточно часто, так как позволяет проводить операцию резания любых материалов различной толщины. Данный процесс характеризуется высокой производительностью, экологичностью, безопасностью, высоким качеством поверхности реза, а также возможностью обработки деталей разной геометрической формы [15]. Правильная настройка подачи абразивной жидкости может минимизировать тепловое воздействие. Это одно из важных преимуществ гидроабразивной резки по сравнению с механической, лазерной и ультразвуковой резкой. Именно на данные технологические преимущества обращают внимание производители ПКМ для стратегически важных отраслей промышленности. Гидроабразивная резка обеспечивает шероховатость  $R_a = 1,6$  мкм [10], в то время как при механической резке она может достичь  $R_a = 6,3–12,5$  мкм [22].

Однако данный метод обладает существенным недостатком из-за начального гидроудара по материалу, который зачастую приводит к его расслаиванию [10, 16]. Следует отметить, что гидроабразивная резка является малоизученным процессом, а на результат обработки ПКМ влияет ряд технологических параметров, таких как: давление, создаваемое в процессе резки; размер и вид сопла; твердость; расход и вид абразивного материала, а также расстояние разрезаемого материала от сопла [15]. Согласно данным, полученным в статье [13], если в структуре ПКМ наблюдаются поры, то гидроабразивная обработка может привести к их увеличению, а впоследствии – к ухудшению физико-механических свойств изделия. Одним из недостатков также является невозможность обрабатывать глухие отверстия [13].

При использовании гидроабразивной резки имеется ряд особенностей, таких как:

- необходимость в обеспечении зазора между соплом и поверхностью материала для образования гидроабразивной струи и отвода гидроабразивной смеси [9, 16];

– трудность при изготовлении толстостенных деталей с ровными по всей толщине краями, так как режущая струя воды при движении в глубину теряет интенсивность и цепляется за слои пластика [17, 18, 21];

– необходимость ограниченного использования воды в качестве режущего инструмента, поскольку в структуре ПКМ имеются поры [12].

В последнее время возникла потребность в создании траекторий резания, которые позволят исключить возможность попадания воды между слоями, чтобы избежать ослабления конструкций – особенно сотовых на основе ПКМ [21].

Согласно данным, полученным в статье [12], при правильном проведении процесса гидроабразивной резки она не оказывает негативного влияния на структуру и механические свойства ПКМ.

Таким образом, гидроабразивная обработка является перспективным методом для проведения резки образцов, так как менее всего повреждает поверхность и оказывает наименьшее тепловое воздействие на ПКМ. Однако водное охлаждение может отрицательно влиять на свойства композиционного материала, поскольку некоторые ПКМ могут быть пористыми или влагопоглощающими.

Лазерная резка является одним из редко используемых методов для резки ПКМ, так как для проведения данного процесса применяется слишком дорогостоящее оборудование. В процессе лазерной обработки ПКМ также существуют некоторые трудности из-за различия свойств полимерной матрицы и наполнителя [14, 16, 35].

При лазерной резке в качестве режущего инструмента используется сфокусированный луч света. Данный метод отличается размером реза, который находится в интервале от 0,2 до 0,8 мм. Одним из преимуществ лазерной обработки является возможность точного автоматического управления процессом [14]. Следует отметить, что по сравнению с механическими методами обработки материалов и методом гидроабразивной резки во время резания лазерным лучом отсутствуют силы резания, которые приводят к появлению в ПКМ внутренних напряжений и остаточных деформаций.

Согласно данным работы [14], наиболее оптимальные результаты достигаются при резке ПКМ с использованием длины волны лазера в ультрафиолетовом диапазоне.

Наиболее распространенные недостатки лазерной резки:

- возникновение зоны термического влияния на кромках реза [14];
- термическая деструкция полимерной матрицы из-за сильного перегрева и образование дефектного слоя [14, 16, 36];
- расслоение и наличие угла разреза, если изделие является толстостенным [14, 16, 35].

Размеры зоны термического влияния, глубина и ширина реза, деструкция матрицы и волокна уменьшаются с увеличением скорости работы и мощности лазерной установки [35]. В статье [35] показано, что зона термического влияния также зависит и от режима лазера – непрерывного или импульсного [35, 36].

При лазерной резке образцов следует учитывать такие параметры, как [35]: продолжительность взаимодействия лазера с ПКМ, плотность мощности лазера, степень отверждения полимерной матрицы в ПКМ, интенсивность пучка и фокусировка лазера, режим работы и способность ПКМ поглощать энергию лазерного излучения.

В последнее время ведутся работы по поиску оптимальных параметров резки и 3D-моделированию разных видов ПКМ, чтобы составить рекомендации по оптимальному сочетанию данных параметров [16, 35–37].

Еще одним бесконтактным методом резки является электроэрозионная обработка, которая также позволяет проводить резку изделий и образцов из ПКМ [19, 38–42]. В данном случае этот метод можно применять только для материалов с ограниченной теплопроводностью. В настоящее время отсутствуют технологические рекомендации по

изготовлению образцов ПКМ отечественного производства методом электроэрозионной обработки [19]. В исследованиях, приведенных в данной статье, этот метод не рассматривается.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [43, 44].

### Материалы и методы

Объектом исследований выбран углепластик марки ВКУ-39/ВТкУ-2.200 на основе высокодеформативного эпоксидного связующего марки ВСЭ-1212 и равнопрочной углеродной ткани саржевого переплетения. Плиты углепластика изготавливали методом автоклавного формования при конечной температуре формования 180 °С и удельном давлении 0,7 МПа.

На рис. 4–7 представлены виды установок для изготовления образцов разными методами.

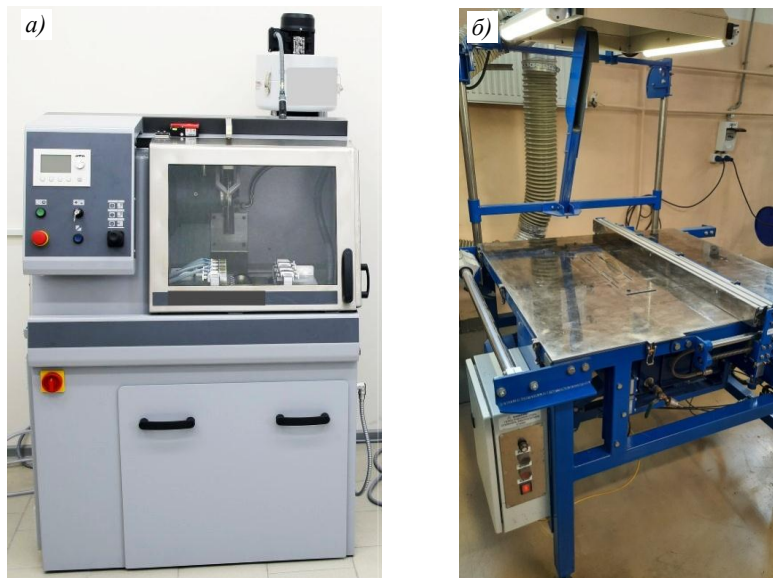


Рис. 4. Станки для резки ПКМ алмазным диском с водяным охлаждением (а) и без охлаждения (б)



Рис. 5. Станок гидроабразивной резки ПКМ



Рис. 6. Фрезеровочный станок для изготовления элементарных образцов углепластика

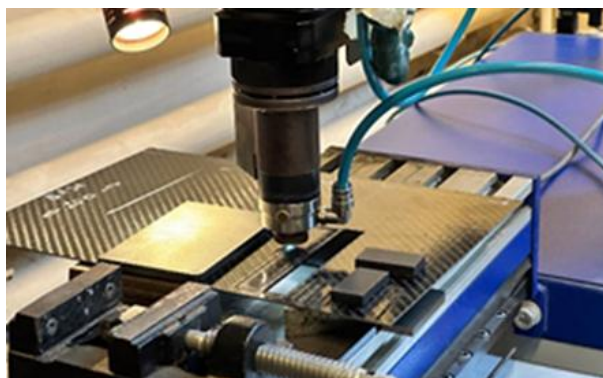


Рис. 7. Процесс изготовления образцов ПКМ методом лазерной резки

Образцы ПКМ для испытаний на трехточечный изгиб изготавливали из плит углепластика пятью способами резки:

- алмазным диском с водяным охлаждением со скоростью вращения диска 2500 об/мин (рис. 4, а);
- алмазным диском без водяного охлаждения со скоростью вращения диска 1450 об/мин (рис. 4, б.);
- с помощью гидроабразивной смеси на автоматическом двухкоординатном станке со скоростью движения рабочей головки 300 мм/мин, давлении 330 МПа, диаметре сопла 2 мм (рис. 5);
- фрезерованием на автоматическом трехкоординатном станке со скоростью движения фрезы 350 мм/мин (рис. 6);
- лазерной резкой на автоматическом двухкоординатном станке с длительностью импульса 2 мс, частотой 15 Гц, скоростью резания 1 мм/с и пиком мощности 80 % (рис. 7).

Полученные образцы измеряли с помощью штангенциркуля (ГОСТ 166–89) и микрометра (ГОСТ 6507–90).

Для определения физико-механических показателей композита использовали метод статического трехточечного изгиба согласно ГОСТ Р 57866–2023.

Определение содержания пустот в ПКМ проводили по ГОСТ Р 56679–2015.

Для определения структуры и дефектов композиционного материала использовали метод рентгенокомпьютерной томографии.

Плотность образцов, изготовленных разными методами резки, измеряли гидростатическим методом согласно ГОСТ 15139–69.

Для проведения испытаний физико-механических свойств ПКМ использовали высокоточную разрывную машину, подходящую по требованиям ГОСТ 28840–90, с максимальным усилием 5 кН и подвижной верхней траверсой. Образцы испытывали при комнатной температуре в интервале 22–24 °С и относительной влажности 40–45 % со скоростью перемещения траверсы 1,3 мм/с.

## Результаты и обсуждение

### *Физико-механические испытания*

Методом автоклавного формования изготовлено пять плит углепластика, далее определена толщина монослоя и плотность каждой плиты расчетным методом (табл. 1).

После изготовления образцов различными методами резки исследованы их плотность и определено содержание пустот, проведены испытания на статический изгиб. Результаты испытаний представлены в табл. 2.

**Параметры\* отформованных плит ПКМ  
на основе препрега углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200**

Толщина монослоя, мм	Плотность, г/см <sup>3</sup>
<u>0,180–0,187</u> 0,185	<u>1,56–1,59</u> 1,58
<u>0,183–0,188</u> 0,184	<u>1,57–1,59</u> 1,58
<u>0,181–0,188</u> 0,185	<u>1,57–1,58</u> 1,57
<u>0,182–0,186</u> 0,184	<u>1,58–1,59</u> 1,58
<u>0,181–0,186</u> 0,185	<u>1,57–1,59</u> 1,58

\* В числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.

Таблица 2

**Результаты определения физико-механических свойств\* углепластика марки  
ВКУ-39/ВТкУ-2.200 при статическом изгибе**

Метод обработки	$\sigma$ , МПа	$E$ , ГПа	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание пустот, %
Резка алмазным диском без водяного охлаждения	<u>1100–1260</u> 1157	<u>53–56</u> 55	<u>1,56–1,59</u> 1,58	<u>0,02–2,08</u> 0,75
Резка алмазным диском с водяным охлаждением	<u>1060–1340</u> 1218	<u>53–56</u> 55	<u>1,57–1,59</u> 1,58	<u>0,22–1,46</u> 0,67
Гидроабразивная резка	<u>1010–1080</u> 1050	<u>49–51</u> 50	<u>1,57–1,58</u> 1,57	<u>1,11–1,65</u> 1,43
Резка на фрезеровочном станке	<u>1020–1260</u> 1034	<u>51–54</u> 52	<u>1,58–1,59</u> 1,58	<u>0,61–1,18</u> 0,89
Лазерная резка	<u>750–1070</u> 874	<u>56–59</u> 57	<u>1,50–1,54</u> 1,52	<u>3,73–5,82</u> 4,52

\* В числителе – диапазон значений, в знаменателе – среднее значение.

По полученным данным построены диаграммы, представленные на рис. 8 и 9.

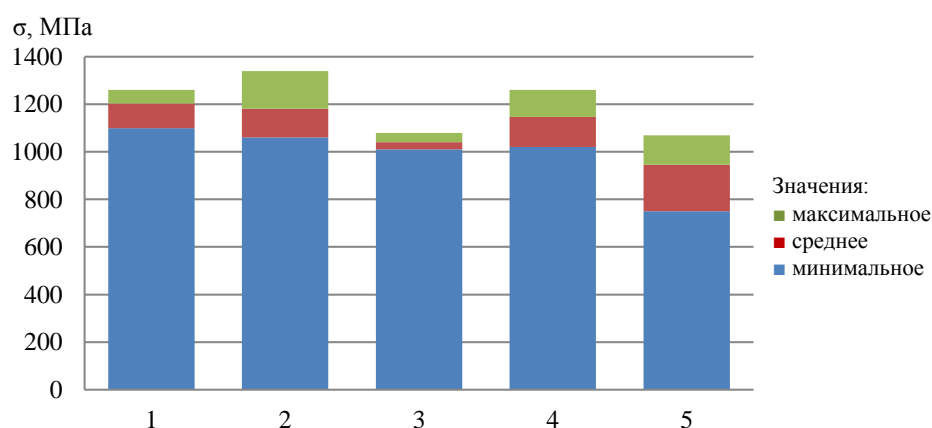


Рис. 8. Диаграмма прочности при статическом изгибе углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в зависимости от вида резки образцов: 1 – резка алмазным диском без водяного охлаждения; 2 – резка алмазным диском с водяным охлаждением; 3 – гидроабразивная резка; 4 – резка на фрезеровочном станке; 5 – лазерная резка

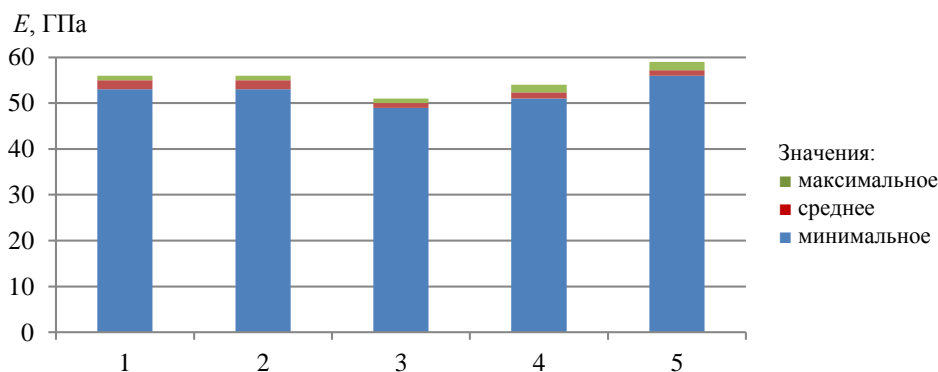


Рис. 9. Диаграмма модуля упругости при статическом изгибе углепластика ВКУ-39/ВТкУ-2.200 в зависимости от вида резки образцов: 1 – резка алмазным диском без водяного охлаждения; 2 – резка алмазным диском с водяным охлаждением; 3 – гидроабразивная резка; 4 – резка на фрезеровочном станке; 5 – лазерная резка

По итогам испытаний ПКМ на статический изгиб можно констатировать, что наименьшей прочностью обладают образцы, изготовленные с помощью лазерной резки, при этом видно, что модуль упругости образца несколько возрастает. Потерю прочности углепластика можно объяснить нарушением целостности полимерной матрицы в зоне реза и потерей адгезионного взаимодействия полимерного связующего с углеродным наполнителем. Возможно, нарушение целостности полимерной матрицы приводит к увеличению в структуре материала пустот и в результате к уменьшению плотности образца углепластика. Однако следует отметить, что образцы, полученные с помощью лазерного станка, имеют преимущество в том, что точность резки находится в пределах  $\pm 0,1$  мм.

Максимальной прочностью при статическом изгибе обладают образцы, нарезанные с помощью алмазного диска с водяным охлаждением. Данное явление связано с тем, что материал в процессе резки не перегревается. В этом случае низкая теплопроводность материала нивелируется с помощью водяного охлаждения, при этом кромка образцов не травмируется и не деформируется. Рассмотренный метод заслуживает особого внимания, если необходимо получить образец без снижения физико-механических свойств во время механической обработки.

Согласно данным, представленным на рис. 8, образцы, нарезанные с помощью фрезы и методом гидроабразивной резки, имеют почти одинаковые средние показатели прочности. Можно предположить, что это связано с тем, что в процессе резки материала создаются вибрационные нагрузки. Однако, как отмечено в статьях [10, 16], в виду гидроудара о поверхность плиты ПКМ способен расслаиваться, при этом вода попадает в микротрещины, что приводит к снижению значений модуля упругости материала по сравнению со значениями, полученными после других методов резки (рис. 9).

Как можно заметить (рис. 8), образцы, нарезанные с помощью алмазного диска без водяного охлаждения, имеют показатели прочности при статическом изгибе, близкие к аналогичным значениям при резке с водяным охлаждением. Этот метод очень сильно зависит от человеческого фактора, так как на резку образцов может повлиять скорость подачи ПКМ на алмазный диск и выставление корректных размеров для резки. Диск, не имеющий водяного охлаждения, способен быстро изнашиваться и перегреваться в процессе резки изделий. Следует отметить, что в данном случае происходит нагрев как алмазно-металлического диска, так и ПКМ, однако в отличие от резки с водяным охлаждением и метода гидроабразивной резки исключено попадание воды в поры.

### *Исследование поверхности углепластика с помощью оптического микроскопа*

Для оценки влияния методов резки на структуру материала и поверхность торцевой части образца проведены исследования с помощью оптического микроскопа. На рис. 10 представлены фотографии поверхностей торцевой части образцов из углепластика, изготовленных разными методами резки.

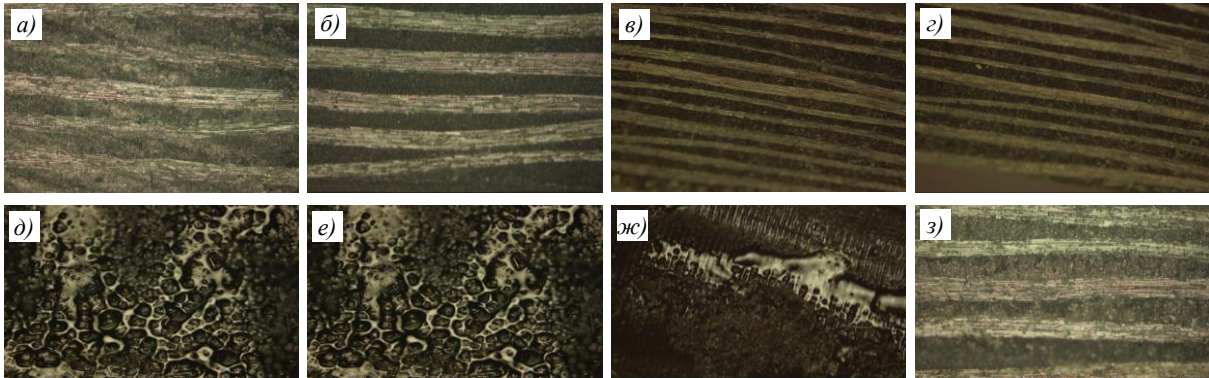


Рис. 10. Изображение поверхностей торцевой части образцов из углепластика, изготовленных разными методами резки: *a* – резка алмазным кругом без водяного охлаждения ( $\times 100$ ); *б* – резка алмазным кругом с водяным охлаждением ( $\times 100$ ); *в*, *г* – гидроабразивная резка ( $\times 50$ ); *д–ж* – лазерная резка ( $\times 100$ ); *з* – резка на фрезеровочном станке ( $\times 100$ )

Видно (рис. 10, *д–ж*), что лазерная резка углепластика сопровождается расплавом и вспениванием полимерной матрицы из-за высоких температур нагрева. На поверхности торцевой части образца ПКМ появляются ярко выраженные наплывы с мелкими пузырями.

Следует отметить, что образцы, нарезанные с помощью гидроабразивной резки, имеют на поверхности небольшие частицы абразива, которые можно заметить с помощью оптического микроскопа (рис. 10, *в*, *г*).

Резка на фрезеровочном станке сопровождается заусенцами и частичным краевым разрушением волокон в ПКМ.

### *Исследование структуры методом рентгенокомпьютерной томографии*

С помощью этого метода исследована глубина дефектной зоны, которая образуется в результате различных методов резки образцов. На рис. 11 представлено трехмерное изображение образцов углепластика с плоскостями сканирования.

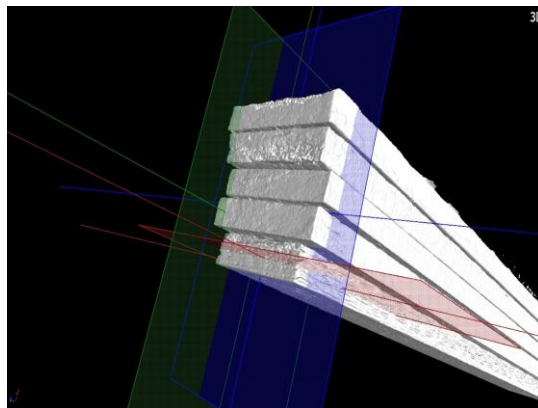


Рис. 11. 3D-изображение образцов ПКМ, нарезанных разными методами резки

На рис. 12 представлены фотографии образцов, которые исследовали методом рентгенокомпьютерной томографии по глубине сканирования.

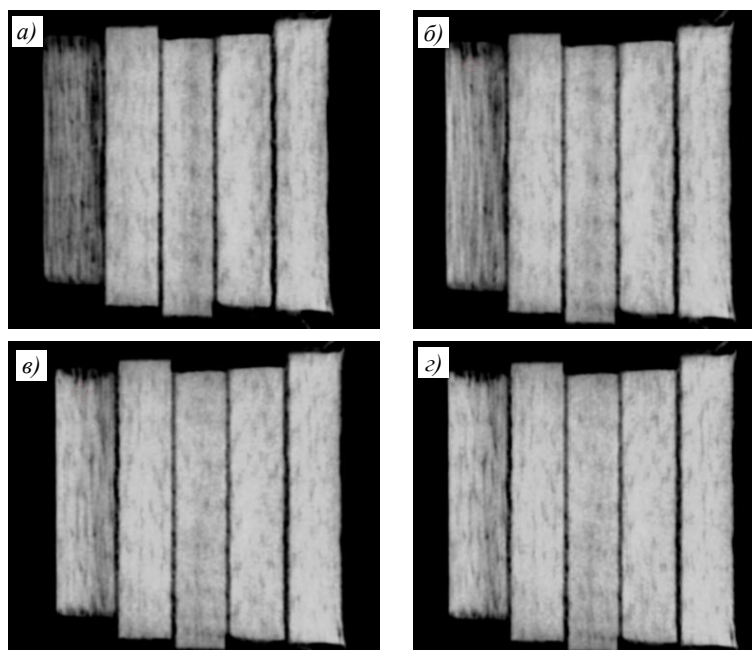


Рис. 12. Рентгенокомпьютерная томография образцов из углепластика (вид с торца), полученных разными методами резки на глубине 0,2 (а), 0,4 (б), 0,6 (в) и 1,1 мм (г), где слева направо образцы, изготовленные методами лазерной резки, гидроабразивной резки, механической резки алмазным кругом с водяным охлаждением, механической резки алмазным кругом без водяного охлаждения и резки на фрезеровочном станке

Видно, что образцы, изготовленные методом лазерной резки, имеют в своей структуре поры, которые образовались в результате выхода расплава полимерной матрицы на поверхность торца углепластика. Это связано с тем, что в процессе разрезания ПКМ связующее перегревается. Глубина пор в структуре ПКМ достигает величины 1,1 мм с торца изделия. В результате перегрева может происходить локальное нарушение адгезии между слоями, что оказывает влияние на прочностные показатели по сравнению с другими методами обработки. Это в свою очередь делает композиционный материал непригодным для эксплуатации. Следует отметить, что данный метод позволяет получить изделие с точными геометрическими параметрами, однако в случае перегрева ухудшаются механические показатели. По сравнению с другими методами применение лазерной резки требует более тщательного выбора параметров процесса воздействия на материал.

Следует обратить внимание на образец, который изготовлен на фрезеровочном станке. Видно, что изготовленный образец имеет заусенцы, так как при данном методе фреза распиливает ПКМ с помощью вращательного движения перпендикулярно плите.

### Заключения

С применением пяти различных методов резки ПКМ получены элементарные образцы для проведения физико-механических испытаний на статический изгиб. По результатам этих испытаний сделан вывод о том, что при механической обработке алмазным кругом с водяным охлаждением прочность образцов имеет наибольшее значение. В данном случае поверхность реза гладкая, без сколов и дефектов, являющихся концентраторами напряжений.

На образцах, изготовленных методом фрезеровки и гидроабразивной резки, получены близкие по уровню средние значения прочности. При обоих методах резки материала создаются вибрационные нагрузки, что может приводить к образованию микротрещин и снижению прочности по сравнению со значениями, полученными на образцах, изготовленных при механической обработке алмазным кругом с водяным охлаждением.

Образцы, полученные методом лазерной резки, имеют наименьшие прочностные показатели, так как происходит нарушение целостности термореактивной матрицы, что в свою очередь приводит к образованию дефектов и снижает механические свойства образца. На поверхности торцевой части образца ПКМ появляются ярко выраженные наплывы полимерной матрицы с мелкими пузырями. Глубина дефектной зоны, образующейся в результате выхода расплава полимерной матрицы на поверхность торца, составляет до 1,1 мм.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность доцентам МГТУ им. Н.Э. Баумана М.А. Мельниковой и А.А. Холопову, а также сотрудникам НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ – резчику стекловолоконистых и стеклопластиковых материалов 3 разряда В.Н. Сизых, технику 2 категории А.А. Смолдыреву, механику С.Н. Лапину, участвовавшим в подготовке образцов к испытаниям.

### Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения // Защита и безопасность. 2014. № 4 (71). С. 28–29.
2. Рудской А.И. Технологическая наследственность при производстве и эксплуатации конструкционных материалов // Технология металлов. 2019. № 2. С. 2–10.
3. Давыдова И.Ф., Каблов Е.Н., Кавун Н.С. Термостойкие негорючие полиимидные стеклотекстолиты для изделий авиационной и ракетной техники // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2009. № 7. С. 2–11.
4. Каблов Е.Н., Сагомонова В.А., Сорокин А.Е., Целикин В.В., Гуляев А.И. Исследование структуры и свойств полимерного композиционного материала с интегрированным вибропоглощающим слоем // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2020. № 3. С. 2–9.
5. Кудрицкий В.Г. Композиционные материалы для узлов трения космического назначения // Полимерные материалы и технологии. 2022. Т. 8. № 3. С. 82–88.
6. Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 720 с.
7. Лурье С.А., Миронов Ю.М., Нелюб В.А. и др. Моделирование зависимостей физико-механических характеристик от параметров микро- и наноструктуры полимерных композиционных материалов // Наука и образование. 2012. № 6. С. 4. DOI: 10.7463/0612.0431339.
8. Петрова А.П., Малышева Г.В. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги. М.: ВИАМ, 2017. 472 с.
9. Слепцов В.В. Методы механической обработки деталей машин, изготовленных из полимерных композиционных материалов (обзор) // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2021. № 34. С. 80–83.
10. Малышева Г.В., Гузева, Т.А., Федоров Б.Б. Особенности гидроабразивной обработки стеклопластиков // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 9. С. 66–70.
11. Юдина Е.В. Современные технологии повышения эффективности и качества механической обработки полимерных композиционных материалов, используемых в ракетно-космической технике // Инновации. Наука. Образование. 2020. № 22. С. 323–332.
12. Голованов Д.С. Исследование влияния гидроабразивной обработки на детали из полимерно-композиционных материалов // Вестник РГТА им. П.А. Соловьева. 2023. № 1 (64). С. 92–98.

13. Голованов Д.С., Митин Р.А., Толкачев А.В. Влияние формообразующей гидроабразивной обработки на комбинированные материалы: полимерно-композиционный материал – титановый сплав // Вестник РГАТА им. П.А. Соловьева. 2023. № 4 (67). С. 45–48.
14. Болотников И.С., Косенко Е.А. Способы и технологические особенности резки полимерных композиционных материалов (обзор) // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (23–25 сент. 2021 г., г. Белгород). Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. С. 19–25.
15. Верченко А.В., Курская И.А., Чигринец Е.Г. Оптимизация процесса гидроабразивной резки заготовок из авиационных материалов // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 1. С. 212–229.
16. Голубева К.Р., Носков А.И. Технологии обработки материалов на основе стеклопластиков // Научно-технические технологии в машиностроении. 2021. № 6 (120). С. 24–28. DOI: 10.30987/2223-4608-2021-6-24-28.
17. Раскутин А.Е., Хрульков А.В., Гирш Р.И. Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций (обзор) // Труды ВИАМ. 2016. № 9 (45). Ст. 12. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 18.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12.
18. Приписнов Я.А., Гришина О.И. Современные методы механической обработки композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 10 (70). Ст. 07. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 18.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-53-61.
19. Дышенко В.С., Донецкий К.И., Минибаев М.И., Абляз Т.Р., Шлыков Е.С., Ширяев В.В. Способы механической и электроэрозионной обработки полимерных композиционных материалов (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 3 (109). Ст. 10. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 18.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-102-120.
20. Хрульков И.А., Гуляев И.Н., Мишкин С.И. Особенности резки полимерных композиционных материалов алмазными кругами (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 4 (110). Ст. 03. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 18.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-22-31.
21. Грищенко Т.А., Мелюхов Н.И., Любушкин В.О. Применение гидроабразивной резки при обработке деталей из полимерных композиционных материалов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2017. № 2 (31). С. 49–55. DOI: 10.5281/zenodo.808901.
22. Макаров В.Ф., Мешкас А.Е. Современные методы механической обработки деталей из высокопрочных композиционных материалов для авиационной и ракетно-космической техники // Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий: межвуз. науч. сб. Уфа: УГАТУ, 2015. С. 14–20.
23. Титов С.А., Рыжова Т.Б., Вермель В.Д. и др. Оценка методом акустической микроскопии повреждений ПКМ при механической обработке (фрезеровании, сверлении) // Материалы V отраслевой конф. по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов «КИМИЛА-2023» (17–18 окт. 2023 г., г. Жуковский). Жуковский: ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, 2023. С. 292–299.
24. Кожевников С.И., Макаров В.Ф. Теоретические исследования влияния траектории фрезерования формообразующих поверхностей на износостойкость оснастки // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2018. № 6. С. 117–120.
25. Дударев А.С., Алексутин А.С. Проблемы моделирования процесса фрезерования полимерных композиционных материалов // Наука, теория, практика авиационно-промышленного кластера современной России: Материалы V Междунар. науч.-производств. конф., приуроченной ко Дню Российской науки (06–07 фев. 2020 г., г. Ульяновск). Ульяновск: УГТУ, 2020. С. 48–56.
26. Половнев Д.И., Баурова Н.И. Выбор методов механической обработки полимерных композиционных материалов, используемых при производстве и ремонте машин // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2019. № 29. С. 77–80.
27. Слепцов В.В. Оценка влияния технологии обработки на качество отверстий в деталях машин из полимерных композиционных материалов // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2022. № 36. С. 113–116.

28. Гераськина М.Е., Казакова Т.Ю., Непомнящий Ю.Г. и др. Способы резки криволинейной поверхности рефлектора, изготовленного методом РТМ-технологии // Решетневские чтения: материалы XXVI Междунар. науч.-практ. конф., посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева (09–11 нояб. 2022 г., г. Красноярск). Красноярск: СибГУ науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, 2022. Ч. 1. С. 20–23.
29. Лобанов Д.В., Данилов П.Г., Владимирова Н.А., Григорьев А.Н. Разработка экспериментального стенда для исследования процесса обработки неметаллических композиционных материалов // Актуальные проблемы в машиностроении. 2021. Т. 8. № 3-4. С. 87–98.
30. Дударев А.С., Нечаева Е.В. Расчет теплонапряженности процесса резания твердосплавным инструментом полимерных композиционных материалов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2022. № 3 (77). С. 152–156. DOI: 10.34771/UZCEPU.2022.77.3.029.
31. Dudarev A.S., Gumarov E.Kh. Study of thermophysics during diamond drilling of fibreglass and carbon fibre-reinforced polymer composites // Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2021. Vol. 25. No. 3. P. 290–299. DOI: 10.21285/1814-3520-2021-3-290-299.
32. Усачева А.О., Гопанцов Д.Н., Вакулин М.С., Казаков И.С. Влияние геометрических параметров концевых фрез на качество поверхности при высокоскоростной обработке углепластиков // Технологии и техника: пути инновационного развития: сб. науч. ст. Междунар. науч.-техн. конф. (09 июня 2023 г., г. Воронеж). Воронеж: ВГТУ, 2023. С. 517–520.
33. Минибаев М.И., Усачева М.Н., Дышенко В.С., Гончаров В.А. Приспособление и инструмент для изготовления образцов из полимерных композиционных материалов на станке с ЧПУ (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 4 (98). Ст. 08. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 22.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-100-109.
34. Минибаев М.И., Раскутин А.Е., Гончаров В.А. Особенности технологии изготовления образцов из ПКМ на станках с ЧПУ (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 1 (73). Ст. 11. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 22.07.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-105-114.
35. Носков А.И., Гильмутдинов А.Х., Асадуллина А.Р. Особенности лазерной резки углеродных полимерных композиционных материалов // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 2. С. 155–164.
36. Ярьеско С.И., Балакиров С.Н. Моделирование композиционного материала для лазерной размерной обработки // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2021. № 3 (250). С. 46–50. DOI: 10.35211/1990-5297-2021-3-250-46-50.
37. Eltawahni H.A., Olabi A.G., Basmage O.M., Benyounis K.Y. CO<sub>2</sub> Laser Cutting of Glass Fiber-Reinforced Plastics // Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials. 2020. Vol. 1. P. 145–159.
38. Ablyaz T.R. Improving the efficiency of electrical discharge machining of special-purpose products with composite electrode tools // Materials. 2021. Vol. 14. No. 20. DOI: 10.3390/ma14206105.
39. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Muratov K.R., Sidhu S.S. Analysis of wire-cut electro discharge machining of polymer composite materials // Micromachines. 2021. Vol. 12. No. 5. DOI: 10.3390/mi12050571.
40. Hsissou R., Benkhaya S., Elharfi A. et al. New epoxy composite polymers as a potential anticorrosive coatings for carbon steel in 3.5% NaCl solution: Experimental and computational approaches // Chemical Data Collections. 2021. Vol. 31. P. 100619. DOI: 10.1016/j.cdc.2020.100619.
41. Hsissou R., Bekhta A., Rafik M. et al. Rheological properties of composite polymers and hybrid nanocomposites // Heliyon. 2020. Vol. 6. No. 6. P. e187. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04187.
42. Thomason J. A review of the analysis and characterisation of polymeric glass fibre sizings // Polymer Testing. 2020. Vol. 85. P. 106421. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106421.
43. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 18.07.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.

44. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

### References

1. Kablov E.N. New generation materials. *Zashchita i bezopasnost*, 2014, no. 4 (71), pp. 28–29.
2. Rudskoy A.I. Technological heredity in the production and operation of structural materials. *Tekhnologiya metallov*, 2019, no. 2, pp. 2–10.
3. Davydova I.F., Kablov E.N., Kavun N.S. Heat-resistant non-flammable polyimide glass-fiber laminates for products of aviation and rocket technology. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2009, no. 7, pp. 2–11.
4. Kablov E.N., Sagomonova V.A., Sorokin A.E., Tselikin V.V., Gulyaev A.I. Study of the structure and properties of a polymer composite material with an integrated vibration-absorbing layer. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2020, no. 3, pp. 2–9.
5. Kudritsky V.G. Composite materials for friction units for space applications. *Polimernye materialy i tekhnologii*, 2022, vol. 8, no. 3, pp. 82–88.
6. Mikhailin Yu.A. *Fibrous polymer composite materials in engineering*. St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2013, 720 p.
7. Lurye S.A., Mironov Yu.M., Nelyub V.A. et al. Modeling the dependencies of physical and mechanical characteristics on the parameters of the micro- and nanostructure of polymer composite materials. *Nauka i obrazovanie*, 2012, no. 6, p. 4. DOI: 10.7463/0612.0431339.
8. Petrova A.P., Malysheva G.V. *Adhesives, adhesive binders and adhesive prepregs*. Moscow: VIAM, 2017, 472 p.
9. Sleptsov V.V. Methods of mechanical processing of machine parts made of polymer composite materials (review). *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroyenii*, 2021, no. 34, pp. 80–83.
10. Malysheva G.V., Guzeva, T.A., Fedorov B.B. Features of waterjet processing of fiberglass. *Sovremennye naukoymkie tekhnologii*, 2018, no. 9, pp. 66–70.
11. Yudina E.V. Modern technologies for improving the efficiency and quality of mechanical processing of polymer composite materials used in rocket and space technology. *Innovatsii. Nauka. Obrazovaniye*, 2020, no. 22, pp. 323–332.
12. Golovanov D.S. Study of the influence of waterjet machining on parts made of polymer-composite materials. *Vestnik RGATA im. P.A. Solovyeva*, 2023, no. 1 (64), pp. 92–98.
13. Golovanov D.S., Mitin R.A., Tolkachev A.V. Influence of form-generating waterjet machining on combined materials: polymer-composite material – titanium alloy. *Vestnik RGATA im. P.A. Solovyeva*, 2023, no. 4 (67), pp. 45–48.
14. Bolotnikov I.S., Kosenko E.A. Methods and technological features of cutting polymer composite materials (review). *Energy and resource-saving technologies and equipment in the road and construction industries: proc. Int. scientific-practical. conf. (September 23–25, 2021, Belgorod)*. Belgorod: BSTU named after V.G. Shukhov, 2021, pp. 19–25.
15. Verchenko A.V., Kurskaya I.A., Chigrinets E.G. Optimization of the process of waterjet cutting of workpieces from aviation materials. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 212–229.
16. Golubeva K.R., Noskov A.I. Technologies for processing materials based on fiberglass. *Naukoymkie tekhnologii v mashinostroyenii*, 2021, no. 6 (120), pp. 24–28. DOI: 10.30987/2223-4608-2021-6-24-28.
17. Raskutin A.E., Khrulkov A.V., Girsh R.I. Technological features of machining of composite materials when manufacturing details of designs (review). *Trudy VIAM*, 2016, no. 9, paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 18, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12.
18. Pripisnov Ya.A., Grishina O.I. Modern methods of mechanical processing of composite materials (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 10 (70), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 18, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-10-53-61.

19. Dyshenko V.S., Donetskiy K.I., Minibaev M.I., Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Shiryaev V.V. Methods of mechanical and electrical discharge machining of polymer composite materials (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 3 (109), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 18, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-3-102-120.
20. Khrulkov I.A., Gulyaev I.N., Mishkin S.I. Features of cutting polymer composite materials with diamond wheels (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 4 (110), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 18, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-4-22-31.
21. Grishchenko T.A., Melyukhov N.I., Lyubushkin V.O. Application of waterjet cutting in processing parts made of polymer composite materials. *Vestnik Inzhenernoy shkoly Dalnevostochnogo federalnogo universiteta*, 2017, no. 2 (31), pp. 49–55. DOI: 10.5281/zenodo.808901.
22. Makarov V.F., Meshkas A.E. Modern methods of mechanical processing of parts made of high-strength composite materials for aviation and rocket and space technology. *Modern trends in metalworking technologies and designs of metalworking machines and components: interuniv. sci. coll.* Ufa: Ufa State Aviation Tech. Univ., 2015, pp. 14–20.
23. Titov S.A., Ryzhova T.B., Vermel V.D. et al. Assessment of PCM damage during mechanical processing (milling, drilling) using acoustic microscopy. *Proceedings of the V industry conf. on measuring equipment and metrology for aircraft research «KIMILA–2023»* (October 17–18, 2023, Zhukovsky). Zhukovsky: TsAGI named after prof. N.E. Zhukovsky, 2023, pp. 292–299.
24. Kozhevnikov S.I., Makarov V.F. Theoretical studies of the influence of the milling trajectory of form-forming surfaces on the wear resistance of tooling. *Avtomatizirovannoe proyektirovanie v mashinostroyenii*, 2018, no. 6, pp. 117–120.
25. Dudarev A.S., Aleksutin A.S. Problems of modeling the milling process of polymer composite materials. *Science, theory, practice of the aviation-industrial cluster of modern Russia: Reports V Int. Sci.-prod. conf., dedicated to the Day of Russian Science* (February 06–07, 2020, Ulyanovsk). Ulyanovsk: USTU, 2020, pp. 48–56.
26. Polovnev D.I., Baurova N.I. Selection of methods of mechanical processing of polymer composite materials used in the production and repair of machines. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroyenii*, 2019, no. 29, pp. 77–80.
27. Sleptsov V.V. Assessment of the influence of processing technology on the quality of holes in machine parts made of polymer composite materials. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroyenii*, 2022, no. 36, pp. 113–116.
28. Geraskina M.E., Kazakova T.Yu., Nepomnyashchiy Yu.G. et al. Methods of cutting a curved surface of a reflector manufactured using RTM technology. *Reshetnev readings: materials of the XXVI Int. scientific and practical. conf., dedicated to the memory of the general designer of rocket and space systems, academician M.F. Reshetnev* (November 9–11, 2022, Krasnoyarsk). Krasnoyarsk: SSU of Science and Technology named after academician M.F. Reshetnev, 2022, part 1, pp. 20–23.
29. Lobanov D.V., Danilov P.G., Vladimirova N.A., Grigoriev A.N. Development of an experimental stand for studying the process of processing non-metallic composite materials. *Aktualnye problemy v mashinostroyenii*, 2021, vol. 8, no. 3-4, pp. 87–98.
30. Dudarev A.S., Nechaeva E.V. Calculation of thermal stress in the process of cutting polymer composite materials with a carbide tool. *Uchenye zapiski Krymskogo inzhenerno-pedagogicheskogo universiteta*, 2022, no. 3 (77), pp. 152–156. DOI: 10.34771/UZCEPU.2022.77.3.029.
31. Dudarev A.S., Gumarov E.Kh. Study of thermophysics during diamond drilling of fibreglass and carbon fibre-reinforced polymer composites. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2021, vol. 25, no. 3, pp. 290–299. DOI: 10.21285/1814-3520-2021-3-290-299.
32. Usacheva A.O., Gopantsov D.N., Vakulin M.S., Kazakov I.S. Influence of geometric parameters of end mills on surface quality during high-speed processing of carbon fiber reinforced plastics. *Technologies and equipment: ways of innovative development: Reports Int. scientific and technical conf.* (June 9, 2023, Voronezh). Voronezh: VSTU, 2023, pp. 517–520.
33. Minibaev M.I., Usacheva M.N., Dyshenko V.S., Goncharov V.A. A device and tool for making sample from polymer composite materials on a CNC machine (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 4 (98), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 22, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-100-109.

34. Minibaev M.I., Raskutin A.E., Goncharov V.A. Peculiarities of technology production specimens of PCM on CNC machines (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 1 (73), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: July 22, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-105-114.
35. Noskov A.I., Gilmutdinov A.Kh., Asadullina A.R. Features of laser cutting of carbon polymer composite materials. *Uspekhi prikladnoy fiziki*, 2019, vol. 7, no. 2, pp. 155–164.
36. Yaresko S.I., Balakirov S.N. Modeling of a composite material for laser dimensional processing. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2021, no. 3 (250), pp. 46–50. DOI: 10.35211/1990-5297-2021-3-250-46-50.
37. Eltawahni H.A., Olabi A.G., Basmage O.M., Benyounis K.Y. CO<sub>2</sub> Laser Cutting of Glass Fiber-Reinforced Plastics. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, 2020, vol. 1, pp. 145–159.
38. Ablyaz T.R. Improving the efficiency of electrical discharge machining of special-purpose products with composite electrode tools. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 20. DOI: 10.3390/ma14206105.
39. Ablyaz T.R., Shlykov E.S., Muratov K.R., Sidhu S.S. Analysis of wire-cut electro discharge machining of polymer composite materials. *Micromachines*, 2021, vol. 12, no. 5. DOI: 10.3390/mi12050571.
40. Hsissou R., Benkhaya S., Elharfi A. et al. New epoxy composite polymers as a potential anticorrosive coatings for carbon steel in 3.5% NaCl solution: Experimental and computational approaches. *Chemical Data Collections*, 2021, vol. 31, p. 100619. DOI: 10.1016/j.cdc.2020.100619.
41. Hsissou R., Bekhta A., Rafik M. et al. Rheological properties of composite polymers and hybrid nanocomposites. *Heliyon*, 2020, vol. 6, no. 6, p. e187. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04187.
42. Thomason J. A review of the analysis and characterisation of polymeric glass fibre sizings. *Polymer Testing*, 2020, vol. 85, p. 106421. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106421.
43. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: July 18, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
44. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

**Информация об авторах**

**Иваньков Роман Русланович**, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Клименко Оксана Николаевна**, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Гуляев Иван Николаевич**, заместитель начальника лаборатории по науке, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Осияненко Наталья Викторовна**, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**Roman R. Ivankov**, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Oksana N. Klimenko**, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Ivan N. Gulyaev**, Deputy Head of the Laboratory for Science, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Natalya V. Osiyanenko**, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 09.01.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 06.02.2025.  
The article was submitted 09.01.2025; approved and accepted for publication after reviewing 06.02.2025.